

全球地质学导论

姜衍文 吴智勇 著



北京)

西北大学出版社

序

《全球地质学导论》一书即将付梓。我应作者之邀，为书作序。

自本世纪60年代以来，地球科学进入了一个被人们称作“地学革命”的空前活跃的历史时期。50年代末期以来相继实施的“国际地球物理年”、“国际岩石圈计划”、“上地幔计划”、“深海钻探计划”、“大洋钻探计划”等一系列大型多边国际合作项目的成功运行，把地质研究的领域从传统的大陆和陆表海拓展到了地球深部和大洋底；天、地、生跨学科的相互交叉和渗透，为有关地球史与生命史的思考和探索提供了更高层次上的宇观背景；高新技术在地质研究中的不断开发和广泛采用，从宏观与微观两个尺度上延伸和拓宽了人们观察地球的视野，从而导致新事实的不断发现和新资料的加速度积累；于是，近两个世纪以来以陆地露头的直接观察描述为基础而建立和完善的经典地质学理论不断受到猛烈的冲击。地球科学理论和观念上的革命已是势所必然。大洋地球物理领域的成就和科学大洋钻探的崭新成果成为新地学理论的两大支柱和新地学分支的生长点。60年代的全球板块构造理论和70年代兴起的古海洋学相继成为新地学革命的突破口。以强调“全球观”为特色的新地学思想给各个地学分支注入了新的活力，把传统地质学支离破碎的定性描述提高到系统的成因机理分析，开创了全球地质学的新纪元。

《全球地质学导论》一书收录了16篇论文，分别从不同的方面展现了全球地质学的地球观、研究思路 and 理论内涵。卷首篇以《大洋钻探：全球地质学的摇篮》为题，简要地回顾了科学大洋钻探的历史，指出历时四分之一个世纪的这一宏伟项目成为全球地质学的摇篮：它为全球板块构造学说提供了直接验证，使沉寂了长达半个世纪之久的活动论再度以挑战者的姿态成为新地学理论的主流学派；它孕育了古海洋学；为全球演化、高分辨率全球地层学、深海沉积理论、全球事件及世界油气资源的分布和成因等重大地学课题提供了大量的信息。接下来的两篇文章分别介绍了大洋钻探计划（ODP）的最新航次和全球地质学对石油资源勘探理论和实践的深远影响。新灾变论是80年代风靡欧美的新地学思潮，它以界限粘土为典型事例，把地学思维推向广阔的宇观背景上。《新灾变论与当代地学思维》一文对新思潮的代表人物之一——W. Alvarez的思路脉络作了简要述评。《天文地质学的发展与展望》、《米兰柯维奇韵律层及其研究意义》和《地质记录中的周期性潮汐沉积层及其研究意义》等三篇文章进一步从天文学和地质学交叉点上阐述了受天文学周期支配的全球事件的成因机理。《古海洋学之兴起》一文扼要介绍了古海洋学的研究内容和成就。从某种意义上说，近代地质学和地质思维是始于人们对天然层状岩石的直接观察而获得启迪和揭开序幕的，这便是近代地质学三大支柱之一的地层学。全球地质学的思维模式给这门古老学科注入了新的生机。本书以较多的篇幅介绍了这方面的进展，包括全息地层学、全球旋回地层学、定量动力地层学、第三纪年代地层学、化学地层学以及生态地层学等诸多分支的发展脉络和成就。深海沉积理论是全球地质学的研究领域和主要生长点之一，本书最后两篇文章分别就深海等深流沉积以及内潮汐和内波沉积的研究进展作了概要的述评。

全球地质学研究正方兴未艾，可以预期，它将继续作为跨世纪地球科学的活跃前沿而发挥重要的导向性的影响。我国地域辽阔，近 70 年来经过几代地质学家的卓越工作已在传统的陆地地质学研究中取得举世瞩目的成果；然而，同发达国家相比，我国在新地学理论方面还存在着明显的差距。《全球地质学导论》一书具有某种前瞻性的意义。在此，我衷心地祝愿它的问世能为我国地学研究的繁荣产生一点积极的影响。

中国科学院院士
中国地质大学教授

殷鸿福
1995年9月

前 言

1994年12月7~9日,中国科学院地学部和国家自然科学基金委员会地球科学部在京联合举办了“大洋钻探与中国地球科学”研讨会,与会的有关部门领导、中科院院士以及各方面专家约50人。会前,中科院16位院士联名起草了“关于我国参加大洋钻探计划的建议”。应汪品先院士的邀请,我荣幸地出席了这次会议。提交会议的12篇报告,会后以“大洋钻探与中国地球科学”为总标题收入《地球科学进展》第10卷第3期。

自60年代末期以来,以深海钻探计划等一系列多边国际合作地学项目的相继实施为契机,地球科学进入了一个空前活跃的时期,人们誉之为“地学革命”。随着新事实的不断发现和新资料的加速积累,长期统治地学领域的许多传统理论和经典概念受到动摇和冲击;新理论、新学说层出,令人有目不暇接之感;天、地、生跨学科的交叉和渗透把地球科学的重大基础课题推向更广阔的字观背景上。以全球变化及全球事件的探索为特色的全球地质学成为新地学思维模式或者新的地球观。事实上,它同科学史上改变了人们“地心说”观念的哥白尼革命,或者上一世纪中叶改变了人们“生命永恒”观念的达尔文革命相比毫不逊色。

还在10年以前,我在佛罗里达州立大学参与美国东岸早第三纪超微化石研究之时,就已经强烈地感受到了新地学思维的汹涌之势。1986年初,以《大洋钻探工程——地球科学的前沿》为题的短文发表在光明日报科学与技术专栏中,首次介绍了这一前沿领域。回国之后与几位青年朋友陆续撰写一些文章,时至今日,汇成此集。

正如去年此时16位院士的联名建议书中指出的,在“跨世纪的中国地球科学中,研究陆地的同时是否研究海洋;国内开展的基础研究是否与国际结合;对大洋钻探跨世纪的计划是旁观还是参与,将在很大程度上决定下世纪我国地球科学与国际的学术距离。由于历史的原因,我国已经错过参与六七十年代DSDP带来的地球科学革命性变革的机会,但绝不应该再错过新世纪的良机”。

当前的这本专辑尽管远不能覆盖这一主题的方方面面,但它毕竟是著者所作的一种努力和愿望,旨在为全球地质学的新思想作一点介绍和宣传,并以此就教于国内地学界的同行们。

在本书撰写过程中,始终得到我的好友——中国石油天然气总公司新技术推广中心主任石宝珩教授——的热情鼓励和支持;书稿完成之日,承中国科学院院士、中国地质大学殷鸿福教授欣然命笔为书作序。著者愿借本书付梓之际向他们表达深深的谢意。

姜衍文

1995.9

目 录

序	殷鸿福
前言	姜衍文
大洋钻探：全球地质学（Global Geology）的摇篮	(1)
大洋钻探计划（ODP）的近期成就和航次预报	(10)
全球地质学与世界油气资源	(14)
新灾变论与当代地学思维	(21)
古海洋学之兴起	(29)
天文地质学的发展与展望	(35)
米兰柯维奇韵律层及其研究意义	(40)
全息地层学——新的挑战	(47)
全球旋回地层学原理与应用	(56)
定量动力地层学原理与应用	(67)
第三纪年代地层学进展	(77)
化学地层学述评	(88)
地质记录中的周期性潮汐沉积层及其研究意义	(97)
论生态地层学理论模式	(112)
深海等深流沉积研究进展	(118)
内潮汐和内波沉积研究进展	(123)

大洋钻探:全球地质学(Global Geology)的摇篮

姜衍文 朱忠德 吴智勇

摘要 本文对过去 25 年来 DSDP/ODP 的运行作了概要的历史性回顾,指出大洋钻探是全新的地质思维——“全球地质学”的摇篮,遍及世界各大洋的总长度 182km 的深海岩心为全球板块构造学说提供了直接证据,孕育了古海洋学;为全球演化、高分辨率全球地层学、深海沉积理论、全球事件及世界油气资源的分布和成因等重大地质课题提供了巨量信息,对新世纪大洋钻探的前景作了展望。

关键词 DSDP/ODP;全球地质学;全球板块构造学说;古海洋学;全球演化;高分辨率地层学

大洋钻探计划(ODP)及其前身深海钻探计划(DSDP)迄今已经运行了四分之一世纪,留下了内容浩瀚的 182 卷科学航次报告。科学史上这一最宏伟的国际合作地质项目,以其巨大的成就和对当代地质各个领域所产生的深远影响,把地球科学带进了世纪之交,它提供了新的地质思维模式,把经历了近两个世纪漫长发展的经典地质学提高到“全球地质学”(Global Geology)。它将作为地球科学史上一座里程碑而载入史册。

科学大洋钻探的简要历史回顾

科学大洋钻探——深洋底取样的思想,可以上溯到本世纪 50 年代末期。

1. 前 DSDP 时期——Mohole 计划

近代地质学理论的建立、发展和完善,经历了差不多两个多世纪的历程,建立了以陆地露头的直接观察和描述为基础的静态的、动态的和历史的经典地质学理论体系。本世纪前半期,新地质思想先驱者们逐渐意识到,只有当把观察思考的视角从陆地扩展到覆盖地球表面积的 72% 的大洋之时,才能真正揭开地球起源和演化之谜,但这在当时只不过是一种直觉而已^[1]。宏观的水陆分布表明:南半球的大约 81% 被大洋覆盖,北半球大洋则占 61%;以新西兰为极的半球海陆分布分别为 89% 和 11%。地球上大陆区域几乎总是(95%)同大洋区域呈对踵关系,大陆平均高程 850m,大洋平均深度约为 3700m。但是,从圈层结构的意义上,无论大陆还是大洋,都不过是地球这个巨大星体的一个饰面而已^[1]。1957 年,美国加州大学 Scripps 海洋研究所的 W. Munk 教授和普林斯顿大学的 H. Hess 教授率先提出了壳/幔界线的深洋底取样计划——钻穿洋底之下约 10km 的莫霍面(Moho)(通常位于陆壳之下 30~40km 深度),这一思想便是稍后推出的 AMSOC Mohole 计划。1961 年 4 月, Mohole 计划的作业船 CUSS I 号在墨西哥湾 Guadalupe 岛海域水深 3800m 之下首次钻探,钻穿了 200m 厚的沉积物(时代为 25Ma)以及其下伏的 14m 玄武岩^[2]。尽管 Mohole 计划随后由于接踵而来的决策思想上的分歧以及技术上和经济上的困境而不幸夭折,但它毕竟是一种探

索,成为尔后的科学大洋钻探的先驱。

2. 深海钻探计划——DSDP 时期

Mohole 计划的失败,给我们留下了深刻的反思:像深海钻探这样耗费巨额资金,需要最先进技术和多学科联合的大型地学项目,必须建立在集团合作甚至国际合作的基础上,否则难以摆脱失败之厄运。1964 年,美国四所最著名的海洋研究机构——加州大学 Scripps 海洋研究所、Woods Hole 海洋研究所,迈阿密大学 Rosenstiel 海洋及大气科学研究生院和哥伦比亚大学 Lamont-Doherty 地质观测站联手组成了“地球深部取样联合海洋研究所”(简称 JOIDES)。次年,Lamont 代表 JOIDES 提出立项报告并获得美国科学基金(NSF)的资助;1966 年,由 Scripps 作为 JOIDES 的首任作业方,正式确立了深海钻探计划(DSDP)。在稍后的几年中,DSDP 的合作伙伴迅速扩展:1968 年,华盛顿大学加盟;1967 年,夏威夷大学、罗得岛大学、俄勒冈大学和得克萨斯 A&M 大学相继加入;1982 年又增加了新伙伴——得克萨斯奥斯汀大学。至此,DSDP 发展成为联手开展海洋研究的十姐妹集团(JOI)。

在 DSDP 运行的最初 8 年间,美国科学基金(NSF)提供经费支持,年耗资达 3300 万美元。1976 年,DSDP 新增了国际合作伙伴——联邦德国、法国、日本、英国和前苏联(初期)加入;随后,加拿大和欧洲科学基金共同体(荷兰、瑞典、瑞士和意大利)相继加盟。至此,DSDP 已扩展成为大型国际合作项目,揭开了科学大洋钻探国际合作(IPOD)的序幕。

1968 年 7 月 28 日,DSDP 的作业船“格洛玛·挑战者号”从得克萨斯州奥兰吉港启航,自此开始了大洋钻探的新纪元。在随后(1968~1983)的 15 年间,“挑战者号”完成了 96 个钻探航次,总航程逾 60 万公里,在 624 个钻位上钻探了 1092 个深海钻孔,采获深海岩心总长度超过 96km^[2],覆盖了除北冰洋之外的全球各大洋。DSDP 的最初一批航次的直接成果便是证实了海底扩张学说,孕育了新的地学分支——古海洋学,并以此为突破,带来了深刻的“地球科学革命”。

3. 大洋钻探计划——ODP 时期

1983 年 11 月,在完成了 DSDP 第 96 航次之后,“挑战者号”退役。接替它的是一艘更壮观更先进的作业船“JOIDES 坚定号”(SEDCO/BP471)。此前由加州大学 Scripps 海洋研究所主持的 DSDP,随即改称为“大洋钻探计划”(ODP),项目的科学作业方由得克萨斯 A & M 大学接替。

ODP 具有更广泛的国际性。除美国之外,参加方还有加拿大、澳大利亚、法国、德国、日本、英国,以及欧洲科学基金组织(包括瑞典、芬兰、挪威、冰岛、丹麦、比利时、荷兰、西班牙、瑞士、意大利、希腊和土耳其)^[2]。至此,ODP 已经扩展成为一个有 19 个伙伴国联手的空前广泛的国际合作项目。

“JOIDES 坚定号”是当代最先进的科学钻探船,船体长 143m,宽 21m,钻塔高 61.5m,排水 16000 吨,续航能力 120 天,钻具总长达 9150m,由计算机控制的动力定位系统能使船只保持固定位置并准确地钻达 8235m 的水下目标。重 400 吨的补偿器使钻具和大洋底保持相对稳定。船上的计算机系统通过卫星导航,并通过卫星同地面站衔接来采集和处理各类数据。

“坚定号”堪称为一座流动的海上科学研究中心,它拥有高 7 层、总面积达 12000 平方英尺的现代化实验室群,包括沉积学、古生物学、岩石学、地球化学、古地磁学、地球物理学等多学科实验室。图书馆收藏全套 DSDP/ODP 航次报告和各类文献。可容纳 65 名船员和 50 名

科学家巡航科学研究。

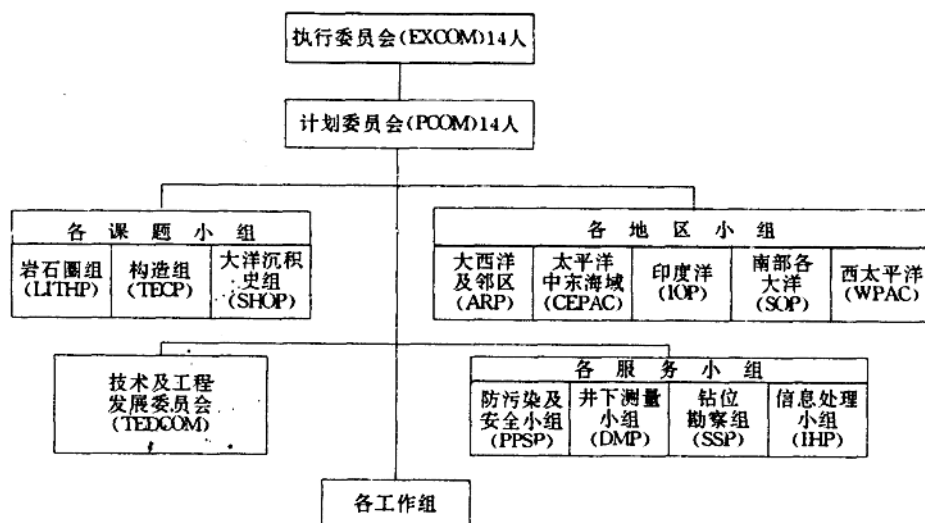
在“挑战者号”退役 18 个月之后,“坚定号”于 1985 年 1 月从美国佛罗里达州劳得戴尔堡启航,它的第 1 个钻位是巴哈马,编序 101 航次。每个航次历时约 8 周。当前正在进行的是第 160 航次(1995 年 5~6 月),目标是钻探 Crete 以西、以南和以东的地中海碰撞边缘。

截至 1993 年,已有来自 25 个国家和 1200 多位科学家登船从事科学研究,发表航次报告 182 卷;采获岩心总长逾 182km。这些宝贵的科学资料已经并且继续对当代地球科学的进步产生深远的影响。

4. ODP 的组织、管理和运行

ODP 的运行由美国 NSF 和伙伴国提供经费并共同组成 ODP 理事会。作为 NSF 的主承包方,非盈利性的十姐妹集团 JOI 以法人团的身份负责 ODP 的管理,负责 ODP 的科学规划运行的宏观指导,保障 JOIDES 所执行的 ODP 运行既符合 NSF 经费的有效性,又实现 ODP 项目的科学目标。

ODP 的运行由 JOIDES 负责具体实施。JOIDES 是一个国际性科学家群体,由 JOI(10 家美国研究所)和 4 个国际伙伴国(加拿大、西德、法国和日本)的科学家组成,以伙伴国基金机构同美国 NSF 之间达成的谅解备忘录(MOU)作为先决条件。JOIDES 下设 ODP 执行委员会(EXCOM),由 14 人(美方 10 人,4 个伙伴国各 1 人)组成,执行委员会委派计划委员会(PCOM)成员(同样 14 人,结构同 EXCOM);计划委员会指派各科学小组和工作组的成员。



自 1985 年 ODP 运行以来的 10 年间,科学钻探一直由得克萨斯 A & M 大学管理,测井服务和数据库则由哥伦比亚大学 Lamont-Doherty 地质观测站(L-DEO)承担。ODP 各航次获取的全部岩心分别收藏在 Scripps、L-DEO 和得克萨斯 A & M 大学,钻位勘察资料 and 全部测井数据保存在 L-DEO。

科学大洋钻探——全球地质学的摇篮

DSDP/ODP 开创了从深部洋底直接钻探取心的新纪元。覆盖全球各大洋的深海岩心蕴涵着揭示大洋起源和演化、大洋环流体系及地球气候的长周期变化、壳/幔物质交互作用及地球岩石圈板块动力学演化过程,以及海底资源特别是烃类资源形成和分布等一系列的地质基础问题的巨量信息。科学大洋钻探的成果提供了从地球各圈层——岩石圈、水圈、冰圈、大气圈和生物圈——的演化重新审视和解释地球动力学演化历史的契机;它把地球科学从经典地质学的支离破碎的定性描述提升到系统的成因机理分析,开创了新的地质思维——“全球地质学”的新纪元。

1. 海底扩张学说的直接验证

本世纪 60 年代,大洋地球物理的一系列重要发现把地球科学推向了重大突破的前夜。声纳测深技术的成熟和深洋底制图的进展导致的重要成就之一便是大洋中脊体系和中央裂谷的发现(M. Ewing 和 B. Heezen, 1956)(H. W. Menard, 1969)。与此同时重要的发现是平行于中脊轴两侧对称式的海底磁异常条带(J. R. Heirtzler, 1968)。洋底沉积物的层序、厚度和地质年代同样也呈现出中脊轴向两侧呈对称式增大的规律。测年数据表明,洋底沉积物的年龄最老也不超过 200Ma,即不到地球自身年龄的 1/20,这意味着,洋底的年龄远比海洋自身的年龄小得多;在古老的大洋水体之下,洋底连同它所荷载的沉积物一直在不断地更新;一条长达 64400 公里、宽数百公里的大洋中脊纵贯大洋中部。地磁、地震和地热资料表明,中脊顶部的中央裂谷,玄武岩浆从地幔深部向上涌升,成为新洋壳的生长点,新增生的洋壳自中脊轴向两侧缓慢地扩张;另一端,洋底俯冲消减形成深海沟,并消逝在地球的深处。这个过程持续不断,洋底更新的周期大约为 200Ma。这便是 60 年代初由普林斯顿大学的 H·H·海斯教授以及稍后的 R·迪茨率先提出,1963 年剑桥大学研究生 F·万因和他的导师 D·H·马修斯用地磁测量图谱验证的“海底扩张假说”。海底扩张说,连同与之相关的地幔对流、转换断层和板块构造诸说一道被纳入了被称为“全球板块构造”的理论体系。至此,沉寂了长达半个世纪的活动论再度以挑战者的姿态成为新地质学理论的主流学派,揭开了地质革命的序幕。

全球构造的理论模型是建立在大洋岩石圈的各种非直接证据——海洋测深、地震、地磁和重力资料基础上的。它的正确性仍然有待直接的钻探证据检验。过去 25 年来,DSDP/ODP 获取的深海岩心一直是验证地球科学假说的天然实验室。钻探业已证实,180Ma 以来,大西洋底的某些部位已经移动了数千公里。海底扩张过程导致了各大陆之间相对位置的不断变换及洋盆面积的不断改变。太平洋盆地中板块移动的速率高达 10cm/a。随着大西洋的不断拓宽,欧洲、非洲和美洲不断地远离大西洋中脊,随着非洲板块与欧洲板块的碰撞,地中海正缓慢地消逝,澳洲板块与东南亚的相撞形成了印度尼西亚火山岛群。

深海岩心的测年数据为海底扩张理论模型提供了直接验证。自 1985 年以来,ODP 布置了 3 个航次(航次 106,航次 109 和航次 153)在大西洋中脊部位钻探取样,前两个航次各取岩心 12m,航次 153(1993. 11~1994. 1)钻探大西洋中脊顶部,采取橄榄岩岩心及辉长岩岩心各 100m,证实了扩张中心部位无沉积物覆盖的年龄为“零”的新生洋壳及其深源属性。

70 年代,根据大洋地震资料与陆地造山带蛇纹岩套的对比研究提出了大洋岩石圈的多

层结构模式,即最上层(层 I)由沉积物组成;层 II 为细粒玄武岩(喷发枕状熔岩或侵入岩墙);层 III 为与层 II 同源的深成—结晶粗粒玄武岩。按照多层洋壳模式的解释,莫霍面即层 III 的辉长岩同残留的上地幔橄榄岩之间的岩石界面^[3]。自 1979 年 DSDP 第 69 航次在东太平洋哥斯达黎加裂谷钻探 504B 孔以来,相继有 8 个航次(DSDP 航次 69、70、83、92;ODP 航次 111、137、140、148)对同一钻孔进行过钻探取心,为上部洋壳的多层结构模式提供了一个范例。迄今,该孔已钻达海底之下 2111m,揭示了第 I 洋壳层 275m 深海软泥和燧石;第 II 洋壳层则包含了约 600m 的枕状熔岩和块状熔岩,其下是席状岩墙,代表自岩浆房至海底之间的固化通道(1200m)过渡段^[4]。遗憾的是,该孔尚未钻达辉长岩。不过,西南印度洋的 735B 孔(ODP 航次 118)和大西洋中脊的 670 孔(航次 109)获取的岩心显示可能属于第 III 洋壳层的高温塑性变形地幔橄榄岩的特性^[3]。

2. 古海洋学的兴起及进展

古海洋学是 70 年代以来最新崛起的一个地质分支。它从直接研究大洋沉积物入手,解释和重建地史时期的海洋水文、海洋化学、海洋生物和海洋沉积的演化过程,其研究范围涉及岩石圈、水圈、大气圈和生物圈等各个圈层,它自诞生之日起便呈现出强烈的跨学科性质和国际合作的时代色彩。古海洋学的出现被誉为继 60 年代全球板块构造学说之后的当代地质学革命的又一次突破。

如果说大洋地球物理的成就和大洋钻探的证实是全球板块构造学说的两大支柱的话,那么,以深海沉积物作为研究手段的古海洋学便是诞生于 DSDP/ODP 摇篮的产儿。60 年代末期,随着 DSDP 最初一批航次的陆续完成,深海取心从最初的表层沉积物扩展到洋底深部,古海洋学的研究成果相继问世。1971 年 3 月,美国经济古生物学家及矿物学家协会(SEPM)于休斯顿举行了关于“大洋地质历史”的学术年会。提交这次会议的 10 篇论文于 1974 年以 SEPM 特刊(SEPM Special Publication)的形式发表,取名为《古海洋学研究论文集》^[5]。它是第一部古海洋学学术专著,内容涉及大洋浮游生物、大洋化学、大洋沉积及古海洋学事件等多个领域。翌年, Van Andel 等发表了《赤道太平洋中部新生代构造、沉积及古海洋学》。1980 年,美国哈佛大学出版社出版了第一本《古海洋学》教科书。两年后, J. P. Kennett 教授的《海洋地质学》专著问世。该书最后一章对全球古海洋演化和大洋历史中若干关键性事件作了详尽的阐述。1983 年 7 月,第一届国际古海洋学学术会议在瑞士苏黎世召开,标志着古海洋学学科日趋成熟。

古海洋学研究的迅速进展不仅受益于 DSDP/ODP 带来的新的地质思想,而且更直接地受益于深海取心技术和井下测试手段的进步。自 70 年代末期以来(航次 64, 钻位 480, 1978), 液压活塞取心器(HPC)成功地应用于 DSDP, 自此, 从深洋底获取未受扰动的连续的沉积物长岩心成为可能。这种高质量的 HPC 岩心可以同时满足生物地层学研究、磁性地层学测定和同位素年代校正三种研究目的的技术要求。取心技术的这项突破, 导致了高分辨率磁性生物地层学(Magnetobiostratigraphy)的应运而生。进入 ODP 阶段之后, HPC 进一步改进成为高级活塞取心技术(APC)。1991 年, 东赤道太平洋上的 ODP 第 138 航次采用这种方法获取了完好无损的层纹状硅藻软泥(ODP 航次 138, 钻位 851), 这些层纹状软泥代表在表层海水高产率期间, 硅藻(*Thalassiothrix*)藻垫周期性地覆盖洋底所形成的产物^[6], 这一发现改变了以往将层纹状沉积物千篇一律解释为缺氧环境沉积的传统观点。

ODP 的另一项重大技术进步是井下测试和监控。从 1991 年 ODP 航次 138 起, 每采收

9.5m 岩心之后,便现场测试高分辨率 GRAPE(伽马射线衰减孔隙度评价仪)密度、磁化率和数字化颜色反射扫描。这些现场测试不仅提高了分辨率,而且从中可以获得井孔周围更大范围沉积物的物理和化学特征,从而更准确地了解周围环境岩石圈应力状态和流体成份的变化,提供更精确的气候变化的信息。所有这些技术上的进展,正在把古海洋学的研究领域从第四纪扩展到重建新第三纪(20Ma)以来的高分辨率古海洋学。ODP138 航次提供了一个良好的范例。

3. 全球气候和环境演化

导致洋壳形成的岩浆活动和火山作用,对于控制大洋中的元素分配和热通量具有重要的影响。正是这类岩浆物质在地表条件下的脱气过程,产生了最初的海洋和大气。岩浆冷却过程释放的热量潜入海底热泉和黑烟口之下的热液系统,产生了矿床,并维系着无光线海底的生态系,很可能,正是海底火山的这种放热效应诱发了周期 4~7 年的全球气候变化的“厄尼诺现象”——秘鲁沿岸暖水洋流的周期性事件。进一步揭示全球气候变化之谜,正有待 ODP 来提供有关地幔岩浆的产生、结晶造壳以及洋壳断裂与热海水循环等方面的更多的关键信息。

ODP 的科学目标之一是钻探高纬度海域以获取影响气候和大洋长周期及短周期变化的关键信息。极区气候变化既是全球气候变化的驱动力,又通过复杂的反馈机制使气候变化进一步加强。1985 年先后在西班牙海域、挪威海域和拉布拉多海/巴芬湾进行的 ODP 航次 103、104 和 105,获得了解释地球长周期变化的关键信息。研究表明,大洋表层环流方式以及地外因素均能对地球气候施加敏感的影响。太阳系行星(主要是木星)引起的地球轨道摄动可能触发并控制地球气候的周期性变化。根据深海岩心,可以测出古洋流系统的实际温度变化,这类数据将成为建立全球气候模式和预测未来气候的重要基础。ODP 的南极海域和环南极海域航次(航次 113、114、119、120)清晰地界定了南极大陆气候演化的几个主要阶段:始新世时期的温暖森林至早渐新世进入冰期,随后又持续发展成大的永久性冰席。造成气候改变的动力学机制究竟是 CO_2 浓度所引起的温室效应? 还是大陆漂移所产生的大洋通道和洋流格局的重组? 答案正有待 ODP 提供更进一步的信息。气候学家们认为,甚至大洋/大气系统的边界条件渐次改变也能够引起平衡模式的快速转换,由于大洋/大气系统中物理的和化学的反馈作用,可能导致平衡模式的瞬时性过度调整^[7]。

米兰柯维奇理论的阐述和逐步证实,是本世纪的重要科学成就之一^[8,9]。ODP 提供了解释第四纪气候变迁的米氏理论的新证据。1990 年西赤道太平洋海域(Ontong 爪哇高原)的 ODP 航次 130 钻位 806 获得了令人满意的信息。岩心氧同位素分析数据清楚地呈现出控制冰量变化的偏心率周期(100ka)和黄赤角周期(41ka)。自下而上,三分性气候变化,分别被称为米兰柯维奇时(41ka 周期),柯勒尔时(过渡段)和拉普拉斯时(100ka 周期)。

4. 高分辨率全球地层学

高分辨率全球地层学的迅速进展,是 DSDP/ODP 最直接的又一贡献。迄今已获取的总长逾 180km 的高质量深海岩心,成为大洋浮游生物地层学的基石。连续的未受扰动的 HPC 长岩心,同时满足生物地层学研究、磁性地层测试和数字同位素年代测定三者的技术需要,建立浮游生物事件基准面(FAD 和 LAD)与磁极反向事件之间的直接结点(Direct tie-point)并提供数字年龄(同位素)标定,孕育了高分辨率地层学分支——磁性生物地层学(Magnetobiostratigraphy)^[10]。1980 年,DSDP 航次 73,根据 HPC 岩心首次实现了南大西洋

早第三纪生物地层带同磁极年表之间的相互校准^[11]。迄今,新生代全球年表的分辨率已接近生物地层学分辨率的理论极限。磁极年表的研究还表明,不同时期磁极反向事件的频率各不相同。例如,中白垩世(118Ma)超级热柱期,洋壳增生速率加快,磁极倒转中断,出现了被称为“超时”(历时长达 35Ma)的中白垩世长正向期^[12]。从 83Ma 以来,反向事件的频率重趋规律,平均为 5 次/Ma,与此相反,某些时期,反向事件的时域可以短至数万年。迄今,在某些海洋磁异常剖面上可分辨出时域短至 20ka 的,被称为“微时”的反向事件^[11]。在最近 3Ma 以来的地史时期内,已鉴别出至少 10 个时域不到 30ka 的这类“微时”事件。当前,磁性地层学的一个重大目标便是进一步证实这类“微时”事件的存在。然而迄今在布朗世(780ka)尚未报导过全球性的、可以编入磁极年表的这类“微时”事件。最近几年 ODP 运行过程中发展的几项旨在提高沉积物测试精度的新技术(X-射线、磁化率和颜色反射率)可望进一步提高时间对比的分辨率(ODP 航次 138),展示了建立超高分辨率全球地层学的良好前景。

5. 深海沉积研究进展

深海沉积过程及其相关理论的研究,随着 DSDP/ODP 的成功运行已取得了长足进展。遍及全球各大洋的深海岩心表明,深海中的陆源物质,大部分是浊流沉积作用的产物。地震或风暴潮引发的水下崩塌,可能触发强大的、能够携带数百立方公里砾石级沉积物的浊流;强大的飓风能够使平静的环礁和珊瑚岛礁掀起巨浪,掀起浊流,在巨大江河的入海口,荷载沉积物的河水能够以超重流的形式顺坡泄入海底形成浊流;此外,由于这类河流快速沉积形成的三角洲也倾向于周期性的垮塌而引发浊流^[13]。所有这些机理所产生的浊流均可在深海平原产生厚的浊积层序。DSDP/ODP 的深海岩心提供了验证浊流机理及其产物的有效途径。迄今,ODP 的不少航次(ODP 航次 113、135、123)已经以高的岩心收获率成功地钻探了以泥质为主的浊流沉积层序,提供了解释深海沉积过程以及物源区的构造隆升和剥蚀过程的大量信息^[13]。1987 年,ODP 航次 116 在孟加拉深海扇进行钻探,采收岩心总长度 996.1m,揭示了喜庙拉雅山脉隆升和剥蚀以及相关海域洋底的构造活动过程。DSDP 航次 96(1983)钻探了密西西比扇,证实了其极端快速的沉积速率(距河口 500km,11m/ka),同时也证实了大规模滑坡对深海扇层序具有重要影响。扇谷口的岩心样品还进一步证实,冰期后的海平面上升引起了沉积过程(沉积速率和沉积类型)的显著改变。1994 年春,ODP 航次 155 在规模更大的亚马逊海底扇进行了钻探^[14],提供了海底扇的相分布以及亚马逊盆地第四纪气候变迁史的重要信息。

另一类型深海沉积——冰筏碎屑沉积物是大陆冰川活动的直接证据。DSDP 最初一批在北大西洋、白令海和挪威海域的钻探航次(DSDP 航次 12、18、19、38、49),获取了冰筏碎屑沉积物岩心,证实了中、晚上新世北半球的冰川活动。1981 年完成的 DSDP 航次 81 以及 80 年代中期的其他几个航次所获得的精确的年代学数据表明,北半球的冰筏作用起始于松山时—高斯时(2.6Ma)^[15]。

1982 年西北太平洋海域的 DSDP 航次 86,首次获取了新生代风成沉积作用的完整记录——红色粘土风尘沉积物。钻探揭示:白垩纪末和新生代大部分时间,风尘通量极低;从 3Ma 开始,随着亚洲的干旱化和北半球的冰川作用,风尘输入量呈现数量级增量。风尘粒径变化提供了风强度的信息。DSDP 航次 86 获得的古新世/始新世之交风尘粒径的减小,表明始新世初期的大气环流强度比晚古新世大大降低。南太平洋的 DSDP 航次 92,印度洋的 ODP 航次 121,以及西太平洋 ODP 航次 130 所获得的自 60Ma 以来的低风尘通量资料表明

了新生代澳洲大陆的风蚀过程。粒径数据表明,晚中新世南半球的信风强度加大。ODP 航次 108 揭示了晚新生代期间风尘自撒哈拉向东部北大西洋搬运的记录,证实了过去几百万年以来非洲大陆的干旱史^[15]。

活跃的深海等深流和大洋底流所产生的巨大等深流沉积——漂积体是最近几十年才被认识的一个新领域^[14]。沿着下部陆坡和大陆隆分布的长条形的漂积体长度可达数百公里,宽数十至数百公里,构成了深洋底的地貌景观。其经过筛选的砂质组分具有明显的远洋生物成因,清楚地表明了其非浊流成因的属性。尽管在南大西洋和南太平洋也鉴别出了等深流漂积体,但迄今,这类沉积类型的信息几乎全部来自北大西洋;DSDP 航次 12、49、93 和 94;ODP 航次 104 和 105,揭示了北大西洋自早渐新世开始便发生了活跃的等深流沉积作用,至中新世,流速进一步加强^[13]。北太平洋的 ODP 航次 145 证实了在形状和几何形态方面与北大西洋相似的漂积体的存在,表明自早渐新世以来,一直活跃着自白令海向南流入北太平洋的一支底流。北印度洋航次(DSDP 航次 22、23;ODP 航次 116、117 和 121)所获取的半远洋泥,揭示了喜马拉雅山脉隆升剥蚀过程:在 11Ma 或 12Ma 之前,沉积速率缓慢而均匀,自 9Ma 起,陆源输入速率加快,从而表明喜山自晚中新世进入了快速隆升和剥蚀期。

6. 全球事件与世界油气资源——以中白垩事件为例

迄今,DSDP/ODP 的钻探成果为阐明中白垩世事件以及中白垩统巨量油气资源的相关性研究提供了丰富的信息。钻探揭示,从 Barremian 期(121Ma),Cenomanian 期,至 Turonian 期,全球大洋沉积物中普遍发育了富含有机质的黑色页岩,它们几乎遍布各大洋盆地和陆间水道。这类黑色页岩被解释为“大洋缺氧事件”(简称 OAE)的产物。研究表明,白垩纪至少发生过三幕 OAE:Barremian 期—早 Albian 期;晚 Cenomanian 期—Turonian 期和 Coniacian 期—Santonian 期,三幕 OAE 分别与三次全球规模的海侵对应,并且与三次有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 峰值相呼应,海侵期间,氧的过量耗竭和有机碳的大量保存导致世界范围的烃源岩的形成。从 Albian 期至 Coniacian 期(即 110~80Ma),这段时间跨度仅占显生宙 5% 的短暂时期,却形成了整个显生宙油气资源量的 60%。过去 25 年来 DSDP/ODP 的钻探成果已为揭示古海洋学事件同全球油气资源之间的成因关系提供了大量的直接证据。

新世纪大洋钻探——展望

历时四分之一世纪的科学大洋钻探将在 10 年之内接近尾声。新的 ODP 长期计划已安排到新世纪之初。新世纪大洋钻探将进一步沿着跨学科科学探索和更大规模的国际合作的方向开拓前进——“全球地震网络”(GSN)正在与 ODP 协调(在 ODP 钻孔中部署井下地震仪)以便使全球地震监测从陆地扩展到大洋;近期,ODP 正在同“Nansen 北极钻探计划”合作,推动在这片尚未探索的大洋盆地获取长岩心,鉴于 ODP 着重于全球气候和大洋历史,因而被公认为“美国全球变化研究计划”的主要贡献者;ODP 正在同大陆钻探界扩大合作,以面对“高温环境钻探作业,发展新的测井技术和实验项目”等共同的难题。此外,“洋中脊跨学科全球实验计划”(Inter RIDGE)和英国的“BRIDGE”计划的实施,也期待着 ODP 的合作,以便进一步发展对新生洋壳的钻探工艺和测试手段^[17]。

可以预期,新世纪的科学大洋钻探将会以更宏伟、更辉煌的丰功伟绩,以浓墨重彩写入人类探索大自然的科学史册。

参 考 文 献

- 1 Kenne J. P. Marine Geology, Prentice-Hall, 1982, 1~313
- 2 Maxwell A. E. An Abridged History of Deep Ocean Drilling, *Oceanus*, 1993, 36(4): 8~12
- 3 Mevel C. Cannat M. Oceanic Crust and Mantle Structure, *Oceanus*, 1993, 36(4): 66~69
- 4 Pezard P. A. DSDP/ODP Downhole Measurements in Hole 504B, *Oceanus*, 1993, 36(4): 79~81
- 5 Hay W. W. Studies in Paleo-Oceanography, SEPM Special Publication, 20, Tulsa, Oklahoma, 1974, 1~218
- 6 Shackelton N. Crowhurst S. Details that make the Difference, *Oceanus*, 1993, 36(4): 45~48
- 7 Zhachos J. C. From the Greenhouse to the Icehouse, *Oceanus*, 1993, 36(4): 57~61
- 8 姜衍文, 朱忠德, 肖传桃, 吴智勇. 全息地层学——新的挑战, 石油与天然气地质, 1995, 16(2): 110~118
- 9 Pisias N. G. Imbrie J. Orbital Geometry, CO₂, and Pleistocene Climate. *Oceanus*, 1987, 29: 43~49
- 10 姜衍文, 吴智勇. 第三纪年代地层学进展, 石油与天然气地质, 1992, 13(2): 182~190
- 11 Gallet Y. Vallet J. P. From the Superchron to the Microchron, *Oceanus*, 1993, 36(4): 99~102
- 12 姜衍文, 吴智勇. 大洋钻探与世界油气资源, 地球科学进展, 1995, 10(3): 251~253
- 13 Normark W. K. Piper D. J. W. Turbidite Sedimentation, *Oceanus*, 1993, 36(4): 107~110
- 14 Firth J. Ocean Drilling News, *Jour. Nannoplankton Research*, 1994, 16(2): 54
- 15 Rea D. K. Terrigenous Sediments in the Pelagic Realm, *Oceanus*, 1993, 36(4): 103~106
- 16 姜衍文, 吴智勇, 王泽中. 深海等深流沉积研究进展, 西北大学出版社, 1993, 1~183
- 17 Malfait B. The Times, They are A-Changing, 25 years of Ocean Drilling, *Oceanus*, 1993, 36(4): 6~7

Scientific Ocean Drilling—The Cradle of Global Geology

Jiang Yanwen Zhu Zhongde Wu Zhiyong

ABSTRACT A brief review for twenty five years of the Deep Sea Drilling Project and the Ocean Drilling Program was made at the present paper. It is believed that the Scientific Ocean Drilling has been the cradle of the modern geoscientific thought and Global Geology. About 182 km of deep sea core recovered from drilling into world's ocean has verified directly the theory of Global Plate Tectonics, carried within itself the newly-emerged geoscience branch—the Paleoceanography, and provides a great quantities of information for such fundamental geoscience problems as the global changes, the high resolution global stratigraphy, the deep ocean sedimentology, the global events and the origin of the hydrocarbon resources in the world's oceans. Finally, a brief prospect for the 21st century's Ocean Drilling Program is discussed as well.

Key Words DSDP/ODP; global geology; global plate tectonics; paleoceanography; global changes; high resolution stratigraphy

大洋钻探计划(ODP)的近期成就和航次预报

姜衍文 吴智勇 肖传桃 李艺斌

大洋钻探计划(ODP)及其前身深海钻探计划(DSDP)已经运行了四分之一世纪,把地球科学带进了世纪之交。

从1968~1983年的15年间,深海钻探计划(DSDP)的作业船“格洛玛·挑战者”号完成了96个航次的科学钻探,总航程逾60万公里。在624个钻位上钻了1092个钻孔,采获深海沉积物岩心总长度超过96km,遍及除北冰洋之外的全球各大洋,发表了内容浩瀚的多卷集的宏篇巨制——《DSDP初步报告》,总字数达7000万字。这个项目所取得的科学成就,如果可以用一句话概括的话,那就是:地质的教科书应当改写。

DSDP所取得的最直接的科学成果便是为海底扩张学说提供了直接证据。它业已证实,迄今为止所有大洋沉积物的地质年龄,最老也不超过180Ma,即不足地球年龄的4%。显然,大洋底的年龄远比海洋自身的年龄小得多——在古老的水体之下,洋底连同它所荷载的沉积物一直在不断地更新。一条长达64400公里、宽数百公里的具有行星规模的大洋中脊纵贯大洋中部。地磁、地热和地震资料表明,在位于洋中脊顶部的中央裂谷部位,玄武岩浆从地幔深部向上涌升,成为新洋壳的生长点,这个过程持续不断。新生的洋壳向中脊两侧缓慢地扩张;与此同时,在另一端,洋底俯冲消减,形成深海沟并消逝在地球的深处。60年代初,由普林斯顿大学的H·H·海斯教授以及稍后的R·迪茨首先提出的,1963年由剑桥大学研究生J·F·万因和他的导师D·H·马修斯用海底地磁测量图谱验证的“海底扩张假说”,终于通过DSDP的科学大洋钻探的实践被直接证实。

“格洛玛·挑战者”号在完成了它的96航次之后,于1983年11月退役。接替它的是另一艘更加壮观,装备更先进的科学钻探船“坚定”号(SEDCO/BP471)。深海钻探计划(DSDP)随之改称为大洋钻探计划(ODP)。“坚定”号于1985年1月从美国佛罗里达州的劳得戴尔堡出发试航,它的第一个钻位是巴哈马,编序为第101航次。

DSDP/ODP的钻探证实,过去180Ma以来大洋底的某些部位已经移动了数千公里。海底扩张过程导致大陆之间的相对位置不断变换,洋盆地面积也不断地改变。太平洋盆地中的板块移动速度高达10cm/a。随着大西洋不断增宽,欧洲、非洲和美洲大陆不断地远离大西洋中脊;随着非洲板块与欧洲板块的碰撞,地中海正在缓慢地消逝;澳大利亚板块与东南亚的相撞形成了印度尼西亚火山岛群。

DSDP/ODP还发现并且证实,在距今5~12Ma之间,地中海曾一度干涸。地中海海底岩心中发现的大套盐类沉积物表明,在上述时期,沟通大西洋和地中海的直布罗陀海峡被堵死,地中海海盆由于水体蒸发形成了比当今的死海大得多的英里级深度的深凹陷,盐湖群间歇性地占据了干涸的海底。钻探还证实了大西洋从一系列狭窄闭塞的盆地演化成为当今宽阔开放的大洋的过程,而这些早期盆地中的沉积物有可能形成重要的油源岩或气源岩。

作为 DSDP/ODP 的另一项科学成果,科学家们发现,构造过程改变了大气环流,从而影响到全球气候。以早期的北大西洋为例,季风以对角线方向跨越年青的大洋吹向美洲,从而在非洲一侧形成了沙漠岸;美洲一侧则形成了森林岸;信风还形成了大洋环流体系,促成非洲侧的上涌流和美洲侧的下降流;这种格局导致了大西洋东岸浮游生物的高产率,最终形成了石油;与此相反,西岸浮游生物产率低,但却有较高的陆源的木质有机碳的注入量,从而形成了天然气。

过去的几年间,ODP 在西班牙沿岸(航次 103)、挪威海(航次 104)和拉布拉多海(航次 105)的航次钻探中取得了解释气候长周期变化的关键性证据。西班牙航次钻探考察洋壳和陆壳的过渡带,考察早期的冰筏作用;挪威海航次旨在考察早期海底扩张过程以及大洋环流、冰川作用的变化规律;拉布拉多海航次旨在了解古生物演化史、气候史、磁异常年代以及拉布拉多海和巴芬湾的张开过程。作为这些航次的最激动人心的成果便是从根本上改变了关于地球已经进入了现代冰期的观点。在 ODP 之前,地质学家们曾经认为,由于南极持续的冰川作用以及界定环南极冷洋流最外缘的极区前沿带的扩展,地球进入了更新世或冰期,据认为,这个以南极为中心的冰川建造已使地球气候下降到了 2.8Ma 前的冰川环境。过去几年间的 ODP 钻探成果已经彻底否定了这种观点。

DSDP/ODP 的科学大洋钻探成果为现代深海沉积学理论研究提供了直接证据。活跃的底流作用贯穿于整个新生代北大西洋海域。底流的搬运、沉积、沉积间断以及深海侵蚀作用,导致广泛分布的巨大漂积体以及盆地级的沉积间断(DSDP Leg93, Site605)。ODP 最近的几个航次,分别在 Yermak 海台和 Fram 海峡进行了深洋沉积物钻探取样,获取了研究大西洋与北冰洋之间通道形成以来沉积物通量变化过程的第一手资料(ODP Leg151),赤道大西洋海域 Ceara Rise 的钻探取样,为新生代古海洋学和底流发育的研究提供了直接证据(ODP Leg154)。

ODP——这项当代最宏伟的国际合作地学前沿项目已经进入了第 10 个科学航次年度,它的宏观研究目标包括:

- 大洋壳的起源和演化;
- 大陆边缘和洋壳的构造演化;
- 海洋沉积层序的起源和演化;
- 地球大气圈、大洋、冰盖、海洋生物以及地磁场的长周期变化及其原因;
- 大洋钻探的设备、工艺及相关研究。

根据 ODP 的宏观日程表,1994,1995 和 1996 年度的钻位、目标和起迄日期如下:

航次 153(1993. 11. 29~1994. 1. 24)

目标:钻探大西洋中脊顶部,揭示了暴露裂谷中的深部地壳和地幔岩石,采收了 100m 橄榄岩以及 100m 辉长岩岩心。

航次 154(1994. 1. 29~1994. 3. 26)

目标:钻探赤道大西洋的 Ceara Rise,研究新生代古海洋学和底流发育史(北大西洋深层水团和南极底水团)。采收了 5800m 岩心,岩心时代自始新世至第四纪。最近 10Ma 的深海沉积物连续取心的采收率高达 100%,下伏沉积物采收率 90%以上。根据同生物地层学结点相关联的物理性质数据、测井数据和颜色分析资料,已识别出了详细的轨道变化的信号,可追溯至渐新世。

航次 155(1994. 3. 39~1994. 5. 26)

目标: 钻探亚马逊海底扇(Amazon Fan)。钻了 21 个钻位, 旨在研究海底扇的相分布以及亚马逊盆地的第四纪气候变迁史。

航次 156(1994. 5. 31~1994. 7. 26)

目标: 钻探北巴巴多斯海岭加积棱柱体, 研究在细粒硅质碎屑沉积背景下洋流与构造变形之间的关系。

航次 157(1994. 7. 31~1994. 9. 25)

目标: 钻探 Madeira 深海平原(MAP), 并钻探 Canary 岛的火山碎屑沉积裙(VICAP)。VICAP 工程的目的是研究火山事件的详细过程及 Grand Canaria 和 Tenerife 诸岛的演化史。

航次 158(1994. 9. 30~1994. 11. 25)

目标: 钻探 TAG——地热“黑烟口”钻位。旨在研究地球化学、矿物学以及沉积物的洋流背景。

航次 159(1995. 3. ~4.)

目标: 钻探几内亚湾的东赤道大西洋转换边缘。研究自早白垩世开始直到现在的转换边缘的构造演化史。

航次 160(1995. 5. ~6.)

目标: 钻探克里特(Crete)以西、以南和以东的东地中海碰撞边缘。研究该区腐殖泥的发育史。

航次 161(1995. 7. ~8.)

目标: 钻探 Alboran 盆地, 研究碰撞边缘区域之内的拉张盆地构造发育史, 并研究西地中海的腐殖泥的发育史。

航次 162(1995. 9. ~10.)

目标: 研究北大西洋—北冰洋通道的第二个科学钻探航次(第 1 次是已于 1993 年 9 月 26 日完成的 Leg151 航次), 研究自新生代以来北冰洋、挪威海—格陵兰海之间的通道的演化发展以及这一海域的古海洋史和古气候史。

航次 163(1995. 11. ~12.)

目标: 钻探 Black 洋脊和 Carolina 海岭, 研究天然气水合物的形成过程。

航次 164(1996. 1. ~2.)

目标: 在大西洋中脊的 Vema 断裂带测试金刚石取心系统; 预期钻遇的岩类为石灰岩和深部地壳岩石(席状岩片和辉长岩)。

历时长达四分之一世纪的 DSDP/ODP 科学大洋钻探项目已经接近了它的尾声。“新世纪大洋钻探”正在筹划之中。1994 年 2 月在日本举行了 21 世纪大洋钻探会议, 提出了下一世纪的设想。可以预期, 这项人类科学史上最宏伟、最壮观的巨大工程将继续给地球科学、环境科学以及相关的科学领域带来革命性的深刻变化和进步。